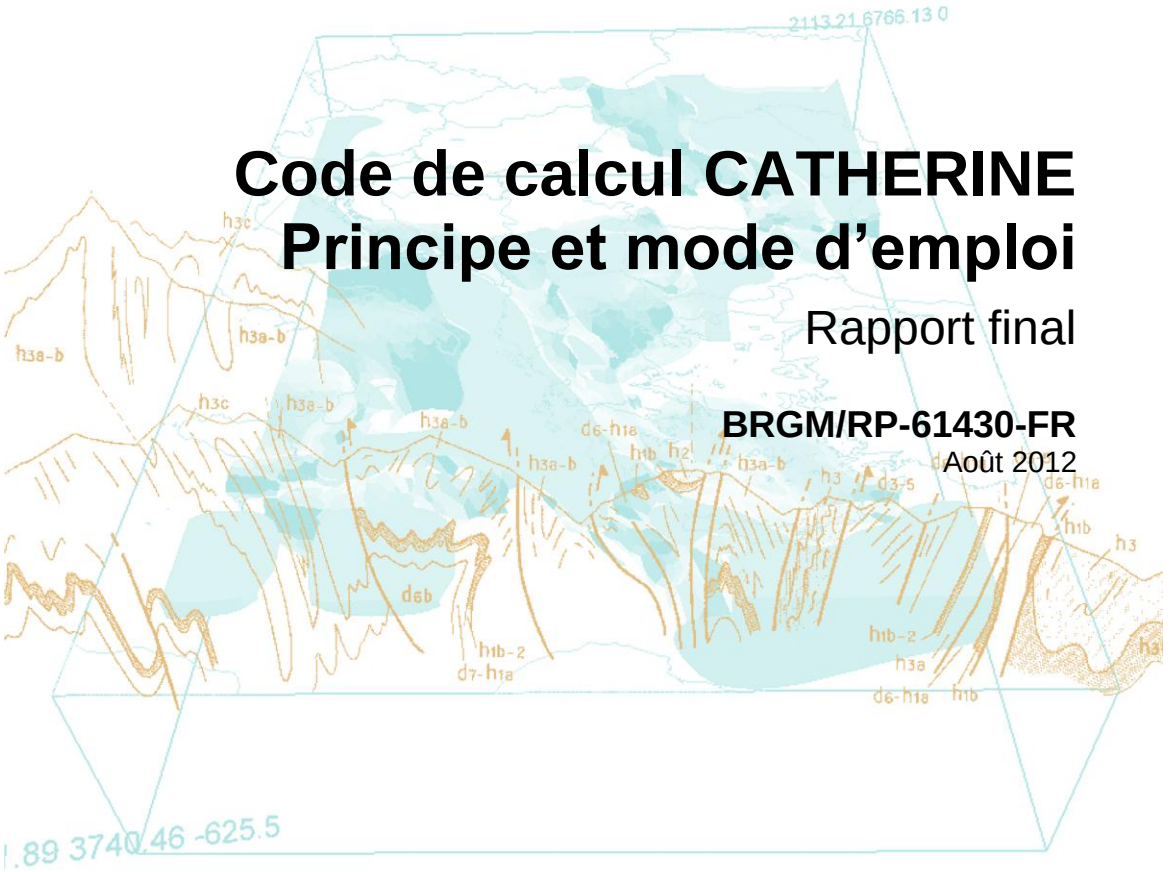
Document public



Code de calcul CATHERINE
Principe et mode d'emploi

Rapport final

BRGM/RP-61430-FR
Août 2012

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Code de calcul CATHERINE
Principe et mode d'emploi

Rapport final

BRGM/RP-61430-FR
Août 2012

Rapport réalisé dans le cadre des projets
de Recherche du BRGM

Dominique THIÉRY

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Y. Barthélémy	Nom : S. Lallier
Date : 12/07/2012	Date : 13/08/2012
Signature :	Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Rivière-Nappe, Onde de crue, Identification diffusivité, Logiciel, Correction marée, Diffusivité thermique.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Thiéry D. (2012) – Code de calcul CATHERINE - Principe et mode d'emploi. Rapport final. BRGM/RP-61430-FR, 39 p., 16 fig., 5 tabl.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le code de calcul CATHERINE v4.1 du BRGM permet de réaliser simplement les opérations suivantes :

- **Pour un aquifère bordé par une limite rectiligne (rivière, lac, mer) dont le niveau varie au cours du temps :**

- Calcul de la diffusivité hydraulique d'un aquifère à partir d'un suivi des variations temporelles simultanées du niveau piézométrique en un point d'une nappe souterraine et du niveau d'eau dans une rivière, dans un plan d'eau ou dans la mer.
  Si on connaît le coefficient d'emmagasinement on peut en déduire la transmissivité (et la perméabilité).
  Réciproquement, si on connaît la transmissivité on peut ainsi en déduire le coefficient d'emmagasinement.
- Calcul des variations de niveau piézométrique en un point d'une nappe dont on connaît la diffusivité et qui est bordée par une limite (rivière, lac, mer) dont on connaît les variations temporelles de hauteur.
- Correction d'un niveau piézométrique des variations de niveau induites par la marée, ou le passage d'une crue ou d'une lâchure. Il est alors possible d'utiliser le niveau piézométrique corrigé pour interpréter un pompage d'essai ou pour modéliser la relation pluie-niveau.

En calcul de transferts d'énergie, il est possible de réaliser les opérations suivantes :

- **Pour un aquifère ou un sol bordé par une limite rectiligne dont la température varie au cours du temps :**

- Calcul de la diffusivité thermique d'un aquifère à partir d'un suivi des variations temporelles simultanées de la température en un point d'un milieu conducteur de la chaleur (sol ou nappe immobile par exemple) et de la température en une limite.
  Si on connaît la conductivité thermique on peut ainsi en déduire la capacité calorifique.
  Réciproquement, si on connait la capacité calorifique on peut en déduire la conductivité thermique.
- Calcul des variations de température en un point d'un milieu dont on connaît la diffusivité thermique et qui est bordée par une limite dont on connaît les variations de température.
  Il est ainsi possible de connaître les variations thermiques dans un sol, connaissant l'évolution de la température en surface (ou dans l'air).
- Correction des variations de températures induites par les variations de température à la surface d'un sol. Il est alors possible d'utiliser les températures corrigées pour analyser l'efficacité d'un stockage de chaleur.

La méthode utilise une solution analytique très facile à mettre en œuvre.

Ce rapport explique la manière d'utiliser le code de calcul CATHERINE v4.1 et présente plusieurs exemples d'application.

Sommaire

1. Principe de la méthode 7

2. Opérations réalisables avec le code de calcul 11

3. Conditions d'application 13

4. Données nécessaires à la mise en oeuvre 15

5. Mode d'emploi du code de calcul CATHERINE 17

5.1 SÉRIES TEMPORELLES D'OBSERVATION DE DONNÉES 17

5.2 PARAMÈTRES DE CALCUL 18

6. Premier exemple d'application : crue ou lâchure dans une rivière 23

6.1 DESCRIPTION DE L'EXEMPLE 23

7. Deuxième exemple : influence de la marée 27

7.1 DESCRIPTION DE L'EXEMPLE 27

8. Troisième exemple : rivière colmatée 31

8.1 DESCRIPTION DE L'EXEMPLE 31

9. Quatrième exemple : transferts thermiques 33

9.1 DESCRIPTION DE L'EXEMPLE 33

10. Conclusion 37

11. Références 39

Table des illustrations

Figure 1 : Schéma de principe 7
Figure 2 : Variation de niveau en fonction du temps adimensionnel. 8
Figure 3 : Fonction erfc(u). 9
Figure 4 : Transfert d'énergie par conduction 10
Figure 5 : Paramètres de calcul 18
Figure 6 : Fichiers utilisés.... 18
Figure 7 : Évolution des niveaux dans la rivière et dans la nappe au pas de temps horaire 23
Figure 8 : Comparaison des niveaux piézométriques observés et calculés à partir du niveau dans la rivière.... 26
Figure 9 : Niveaux au pas de temps horaire dans la mer et dans la nappe.... 27
Figure 10 : Comparaison des niveaux piézométriques observés et calculés à partir du niveau dans la mer 30
Figure 11 : Quatre piézomètres : ajustement de 1/sqrt(D_1m) en fonction de la distance.... 32
Figure 12 : Évolution de la température à 20, 200, 400 et 650 cm de profondeur, de 2006 à 2010 33
Figure 13 : Températures observée et simulée à 200 cm à partir de la température à 20 cm. 35
Figure 14 : Températures observée et simulée à 400 cm à partir de la température à 200 cm 35
Figure 15 : Températures observée et simulée à 650 cm à partir de la température à 400 cm 36
Figure 16 : Températures observée et simulée à 200 cm, 400 cm et 650 cm.... 36

Tableau 1 : Début du fichier des données (Riviere_et_NivNap_Crue_Num.prn). 23
Tableau 2 : Début du fichier des données (NivNap_et_Mer_Martiniq_Date.prn). 27
Tableau 3 : Données des quatre piézomètres à proximité d'une rivière colmatée 31
Tableau 4 : Données de diffusivité apparente sans prise en compte du colmatage.... 32
Tableau 5 : Calcul de la diffusivité thermique en 3 tranches de profondeur du sol. 35

1. Principe de la méthode

On considère un aquifère bordé d'un côté par une limite rectiligne qui est constituée par une rivière, un plan d'eau ou la mer. Dans l'autre direction, perpendiculaire à la limite, l'aquifère est d'extension infinie (Figure 1).

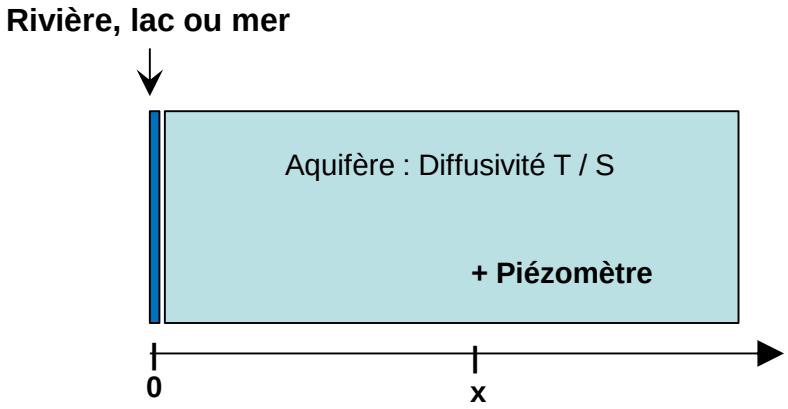


Figure 1 : Schéma de principe : piézomètre situé dans un aquifère bordé par une rivière, un plan d'eau ou la mer.

L'épaisseur mouillée dans l'aquifère est peu variable dans l'espace et le temps. Sa transmissivité est donc considérée comme uniforme.

En moyenne, cet aquifère est :

- en équilibre avec cette limite ;
- ou bien soumis à un écoulement vers cette limite ou depuis cette limite.

Cet aquifère peut donc être considéré comme un milieu poreux homogène à une seule dimension, d'extension semi-infinie. Il peut être décrit par les variables suivantes :

- K = perméabilité à l'eau [LT^{-1}] ;
- S_L = coefficient d'emmagasinement en nappe libre [-] ;
- S_S = coefficient d'emmagasinement captif spécifique [L^{-1}] ;
- b = épaisseur moyenne de l'aquifère [L] ;
- E = épaisseur aquifère saturée [L] ;
- H = niveau piézométrique (ou charge hydraulique) [L] ;
- x = distance à la limite [L] ;
- t = temps [L].

On note **T** la transmissivité de l'aquifère :

- si l'aquifère est captif : $T = K . b$ [L^2T^{-1}] ;
- si l'aquifère est libre : $T = K . E$ [L^2T^{-1}].

On note **S** le « coefficient d'emmagasinement des hydrogéologues » de l'aquifère. Ce coefficient d'emmagasinement sans dimension est défini de la manière suivante :

- si l'aquifère est captif : $S = S_S \cdot b$ [-] ;
- si l'aquifère est libre : $S = S_L$ [-].

On note alors **D** la diffusivité (hydraulique) :

- $D = T / S$ [L^2T^{-1}], donc en m^2/s dans le système international.

On considère que le système est initialement au repos au niveau initial H_i.

Au temps t = 0, le niveau de la limite est modifié instantanément d'une hauteur $h_0 = H_0 – H_i$.

On montre facilement que la variation **h** de niveau piézométrique au temps **t,** à la distance **x** de la limite s'écrit :

$$h(x,t) = h_0 \cdot erfc(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}) \qquad \text{(Figure 2)}$$

avec :

- erfc(u) = Fonction « erreur complémentaire » ; erfc(u) = 1 - erf(u) (Figure 3)
- erf(u) = Fonction erreur : $erf(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} \cdot dz$

Les fonctions erf(u) et erfc(u) sont disponibles dans le logiciel Excel et dans les compilateurs modernes (Fortran, 2008).

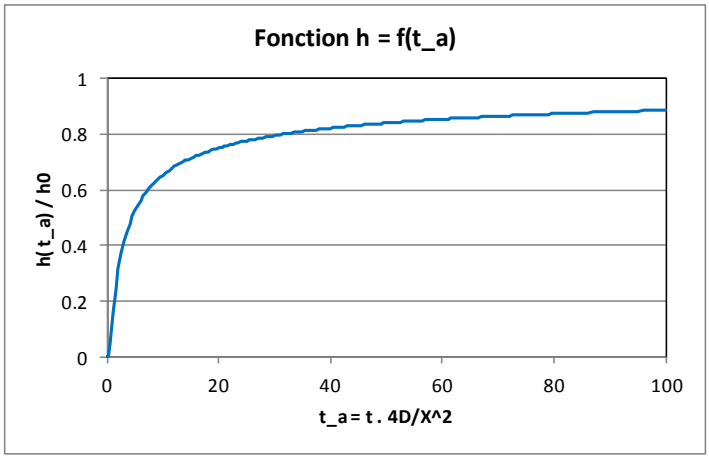


Figure 2 : Variation de niveau en fonction du temps adimensionnel.

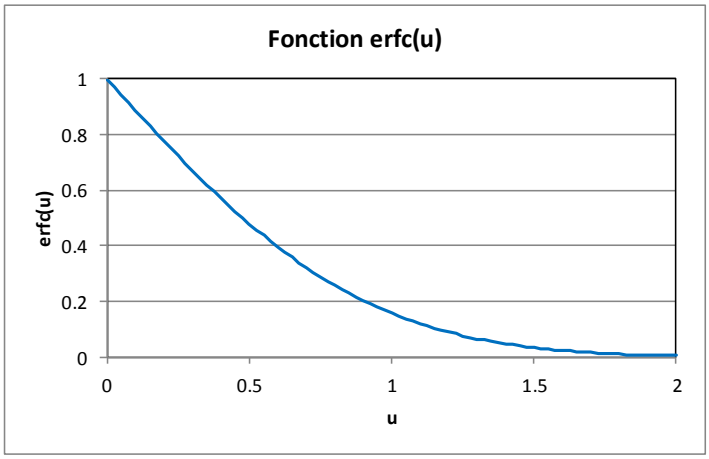


Figure 3 : Fonction erfc(u).

On considère maintenant que le niveau de la limite subit une variation $h_1 = H_1 - H_i$ pendant une durée dt, puis $h_2 = H_2 – H_i$ à partir de cette date.

Pour t ≥ dt, la variation de niveau piézométrique en un point situé à la distance x s'obtient alors par le théorème de superposition :

$$h(x,t) = h_1 \cdot erfc\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) + (h_2 - h_1) \cdot erfc\left(\frac{x}{\sqrt{4D \cdot (t - dt)}}\right)$$

De même, par convolution, on obtient pour la date t = n.dt la variation de niveau piézométrique :

$$h(x, n.dt) = \sum_{k=1}^{n} \left[(h_k - h_{k-1}) \cdot erfc\left(\frac{x}{\sqrt{4D \cdot (t - k.dt)}}\right)\right]$$

avec : h_k = variation de hauteur $H – H_i$ de la date (k-1).dt à la date k.dt

Le théorème de superposition permet de déduire que la solution s'applique également si la nappe n'est pas initialement au repos mais présente un écoulement uniforme dirigé vers la limite ou bien au contraire partant de la limite.

Les équations étant identiques pour la conduction thermique, il est possible d'utiliser exactement la même solution pour les transferts d'énergie. Le domaine est alors un milieu conducteur de la chaleur, sol ou nappe immobile par exemple, bordé par une limite soumise à des variations de température. On dispose d'un point d'observation situé à la distance **x** dont on suit l'évolution de la température (Figure 4).

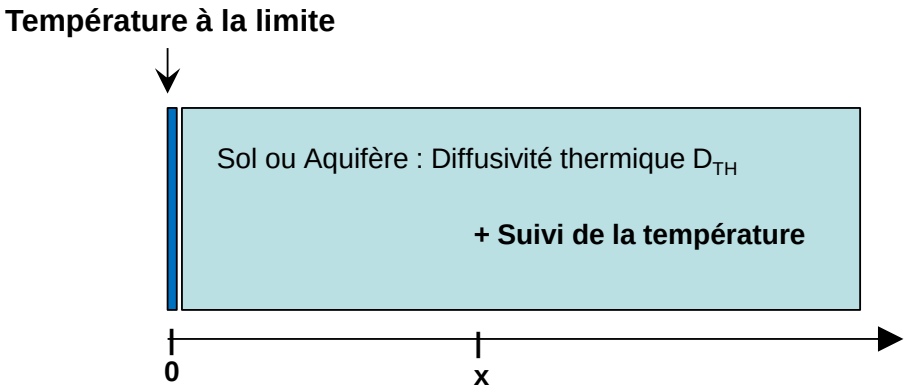


Figure 4 : Transfert d'énergie par conduction.

Le matériau est caractérisé par sa chaleur spécifique **ρC** (en $J/m^3/K$) et sa conductivité thermique **λ** (en W/m/K). La diffusivité thermique $\mathbf{D_{TH}}$ est le rapport **λ** / **ρC** qui est donc exprimé en m^2/s, comme la diffusivité hydraulique.

Pour utiliser la solution décrite ci-dessus, il suffit de remplacer :

- la diffusivité hydraulique par la diffusivité thermique ;
- les niveaux par les températures

L'équation s'applique à la conduction thermique. Les transferts de chaleur par convection, dus à l'écoulement d'eau, devront être négligeables devant les transferts par conduction.

2. Opérations réalisables avec le code de calcul

Le code de calcul CATHERINE « **CA**(lcul) **TH**(éorique de l')**E**(ffet d'une) **RI**(vière sur une) **N**(app)**E** » v4.1, très simple de mise en œuvre, permet de réaliser les opérations suivantes.

Pour un aquifère bordé par une limite rectiligne (rivière, lac, mer) dont le niveau varie au cours du temps :

- Calcul de la diffusivité hydraulique d'un aquifère à partir d'un suivi des variations simultanées du niveau piézométrique en un point d'une nappe souterraine et du niveau d'eau dans une rivière, dans un plan d'eau ou dans la mer.
  Si on connaît le coefficient d'emmagasinement, on peut en déduire la transmissivité (et la perméabilité).
  Réciproquement, si on connaît la transmissivité on peut ainsi en déduire le coefficient d'emmagasinement.
- Calcul de la diffusivité hydraulique d'un aquifère à partir d'un suivi des variations simultanées du niveau piézométrique en deux piézomètres.
- Calcul des variations de niveau piézométrique en un point d'une nappe dont on connaît la diffusivité et qui est bordée par une limite (rivière, lac, mer) dont on connaît les variations de hauteur.
- Correction d'un niveau piézométrique des variations de niveau induites par la marée, ou le passage d'une crue ou d'un lâcher. Il est alors possible d'utiliser le niveau piézométrique corrigé pour interpréter un pompage d'essai ou pour modéliser la relation pluie-niveau.

En calcul de transferts d'énergie, il est possible de réaliser les opérations suivantes, pour un aquifère ou un sol bordé par une limite rectiligne dont la température varie au cours du temps :

- Calcul de la diffusivité thermique d'un aquifère à partir d'un suivi des variations simultanées de la température en un point d'un milieu conducteur de la chaleur (sol ou nappe immobile par exemple) et de la température en une limite.
  Si on connaît la conductivité thermique on peut ainsi en déduire la capacité calorifique.
  Réciproquement, si on connait la capacité calorifique on peut en déduire la conductivité thermique.
- Calcul de la diffusivité thermique d'un aquifère à partir d'un suivi des variations simultanées de la température en deux points.
- Calcul des variations de température en un point d'un milieu dont on connaît la diffusivité thermique et qui est bordée par une limite dont on connaît les variations de température.
  Il est ainsi possible de connaître les variations thermiques dans un sol, connaissant l'évolution de la température en surface (ou dans l'air).
- Correction des variations de température induites par les variations de température à la surface d'un sol. Il est alors possible d'utiliser les températures corrigées pour analyser l'efficacité d'un stockage de chaleur.

3. Conditions d'application

Pour pouvoir appliquer la méthode, le système doit respecter les conditions suivantes :

- **Pour les calculs hydrauliques :**

- La limite de l'aquifère doit être rectiligne.
- La diffusivité hydraulique T/S doit être à peu près constante. Attention pour les nappes libres.
- Pour une identification de la diffusivité, le niveau piézométrique doit réagir uniquement aux variations de niveau de la limite. Il ne doit pas y avoir d'autres phénomènes perturbateurs comme des pompages voisins ou des précipitations.

- **Pour les calculs thermiques :**

- La limite de l'aquifère (ou du sol) doit être rectiligne.
- Les transferts d'énergie doivent se faire essentiellement par conduction thermique. Les transferts par convection (déplacement de l'eau) doivent donc être négligeables. La vitesse d'écoulement dans la nappe ou le sol doit donc être faible.
- La diffusivité thermique, donc la conductivité thermique et la capacité calorifique doit être à peu près constante.
- Pour une identification de la diffusivité, la température au point d'observation doit réagir uniquement aux variations de températures à la limite. Il ne doit pas y avoir d'autres phénomènes perturbateurs comme des stockages d'énergie ou autres.

4. Données nécessaires à la mise en oeuvre

Pour appliquer la méthode on doit disposer de deux séries temporelles d'observations échantillonnées pendant la même période à un pas de temps régulier, adapté aux variations de niveaux, par exemple au pas de temps horaire.

Ces séries sont respectivement :

- la série temporelle des niveaux dans la limite de la nappe (rivière, plan d'eau ou mer). Cette série est dite « série influençante » ;
- la série temporelle des niveaux piézométriques observés dans un piézomètre situé dans la nappe. Cette série est dite « série influencée » ;
- si on dispose de suivis de niveaux en plusieurs piézomètres, il est également possible d'appliquer la méthode entre deux piézomètres.

Si on s'intéresse aux transferts thermiques les séries sont respectivement :

- la série influençante est la série temporelle des températures de la limite ;
- la série influencée est la série temporelle des températures au point influencé ;
- si on dispose de suivis de température en plusieurs points, il est également possible d'appliquer la méthode entre deux points.

5. Mode d'emploi du code de calcul CATHERINE

5.1. SÉRIES TEMPORELLES D'OBSERVATION DE DONNÉES

Les deux séries d'observations peuvent être données sous plusieurs formes. La plus naturelle est de regrouper les deux séries dans un fichier texte comportant deux colonnes : une colonne pour chaque série, une ligne pour chaque pas de temps. Logiquement :

- dans la colonne n° 1 la série influençante, c'est-à-dire la série des niveaux dans la rivière ou la mer (ou bien la température de la limite) ;
- dans la colonne n° 2 la série influencée, c'est-à-dire la série des niveaux piézométriques (ou bien la température influencée).

Sur chaque ligne, les données des colonnes sont séparées au choix par une tabulation, un espace ou une virgule.

La première ligne du fichier doit toujours contenir un titre descriptif.

Il est également possible d'avoir les données des séries d'observations sous d'autres formes :

- Un seul fichier texte, comportant plus de deux colonnes. Comme précédemment, une colonne pour chaque série, une ligne pour chaque pas de temps. Par exemple :
  - colonne n° 1 : le numéro d'ordre du pas de temps ou la date,
  - colonne n° 2 : les niveaux dans la rivière ou la mer,
  - colonne n° 3 : les niveaux dans un premier piézomètre,
  - colonne n° 4 : les niveaux dans un deuxième piézomètre.
- Dans deux fichiers séparés. Dans chaque fichier, la première ligne est un titre descriptif, suivie des données de chaque pas de temps, une valeur par ligne. Il doit y avoir le même nombre de données dans chacun des deux fichiers.

Les données de niveaux doivent, *a priori*, être en mètres. Il peut s'agir de niveaux absolus ou de niveaux relatifs. Si les niveaux n'étaient pas donnés en mètres, mais dans une autre unité, par exemple en cm, il faudrait utiliser cette unité pour les deux séries de données et également pour la distance. La diffusivité hydraulique serait alors exprimée en cm^2/s au lieu d'être en m^2/s.

Au lieu de donner les niveaux piézométriques en « niveaux » positifs vers le haut, il est possible de les donner en profondeurs, positives vers le bas. Ce choix devra être précisé dans un des paramètres de calcul.

La série influençante doit être continue, sans valeurs absentes. La série influencée peut présenter des valeurs absentes qui seront codées avec la valeur 9999. Ces valeurs seront alors ignorées lors des calculs de calibration.

Si le code de calcul CATHERINE est utilisé pour des transferts thermiques, les données des séries peuvent être indifféremment en degrés C ou en degrés K.

5.2. PARAMÈTRES DE CALCUL

Pour utiliser le code de calcul, une boîte de dialogue permet de saisir les informations nécessaires à la modélisation. Ces options et paramètres sont sauvegardés dans un « fichier des paramètres » d'extension [.cather]. Ce fichier des paramètres peut être réutilisé, après modifications éventuelles, pour des calculs ultérieurs (Figure 5 et Figure 6).

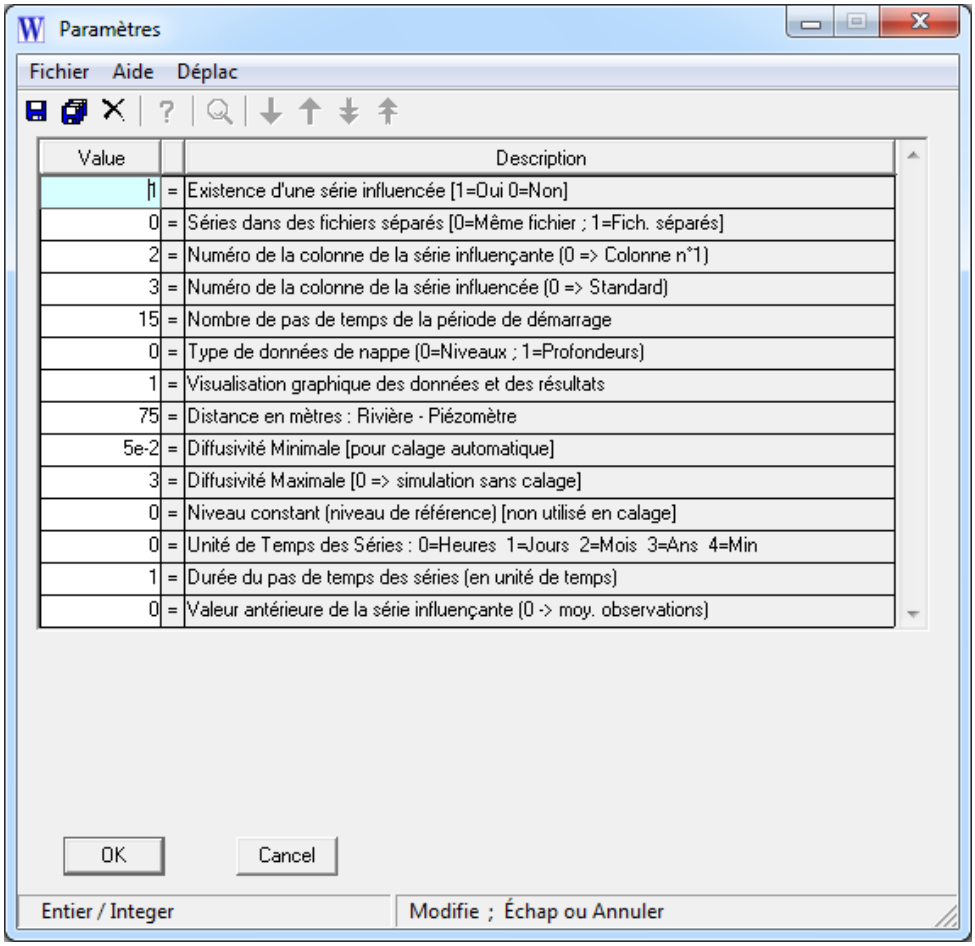

Paramètres
Fichier Aide Déplac
Value
Description
1 = Existence d'une série influencée [1=Oui 0=Non]
0 = Séries dans des fichiers séparés [0=Même fichier ; 1=Fich. séparés]
2 = Numéro de la colonne de la série influençante (0 => Colonne n°1)
3 = Numéro de la colonne de la série influencée (0 => Standard)
15 = Nombre de pas de temps de la période de démarrage
0 = Type de données de nappe (0=Niveaux ; 1=Profondeurs)
1 = Visualisation graphique des données et des résultats
75 = Distance en mètres : Rivière - Piézomètre
5e-2 = Diffusivité Minimale [pour calage automatique]
3 = Diffusivité Maximale [0 => simulation sans calage]
0 = Niveau constant (niveau de référence) [non utilisé en calage]
0 = Unité de Temps des Séries : 0=Heures 1=Jours 2=Mois 3=Ans 4=Min
1 = Durée du pas de temps des séries (en unité de temps)
0 = Valeur antérieure de la série influençante (0 -> moy. observations)
OK
Cancel
Entier / Integer
Modifie ; Échap ou Annuler

Figure 5 : Paramètres de calcul.

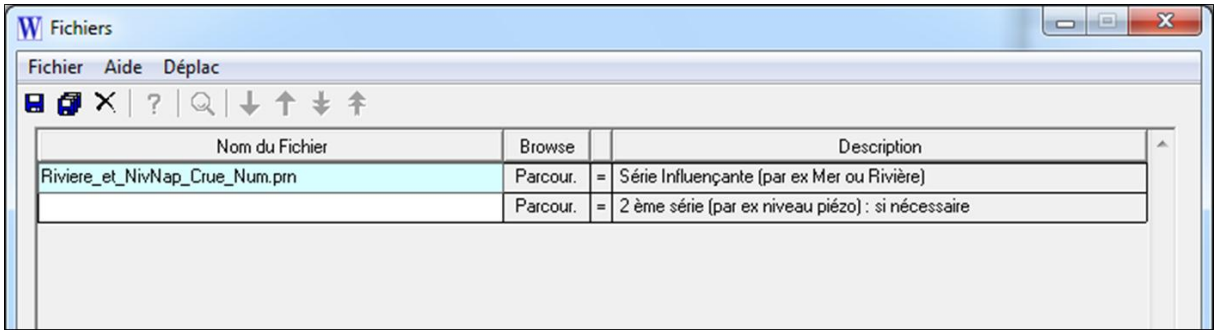


Figure 6 : Fichiers utilisés.

Pour les options de type « oui / non », la valeur numérique « 1 » signifie « oui » et la valeur numérique « 0 » signifie « non ».

Voici la signification détaillé des paramètres :

- **Existence d'une série influencée [1=Oui 0=Non] :**

- Réponse = 1 : Il y a une série influencée, c'est-à-dire une série temporelle d'observations de niveaux piézométriques.
- Réponse = 0 : Il n'y a pas de série influencée. On fera alors uniquement une simulation de niveaux piézométriques à partir de la série influençante et d'une diffusivité donnée.

- **Séries dans des fichiers séparés [0=Même fichier ; 1=Fichiers séparés] :**

- Réponse = 0 : Par défaut la série influençante et la série influencée sont dans un même fichier (conseillé).
- Réponse = 1 : Les deux séries sont dans des fichiers séparés.

- **Numéro de la colonne de la série influençante (0 => colonne n°1) :**

- Par défaut, si on laisse la valeur 0, la série influençante est dans la colonne n°1 du fichier. Sinon on donne ici le numéro de la colonne du fichier contenant cette série.

- **Numéro de la colonne de la série influencée (0 => standard) :**

- S'il n'y a pas de série influencée, ce paramètre est sans objet.
- S'il y a une série influencée : Numéro de la colonne du fichier contenant cette série.
- Par défaut, si on laisse la valeur 0 : la série influencée est logiquement dans la colonne n°2 si les séries sont dans un même fichier, et dans la colonne n°1 si elles sont dans des fichiers séparés.

- **Nombre de pas de temps de la période de démarrage :**

- C'est le nombre de pas de temps nécessaires au démarrage. En effet, les niveaux piézométriques calculés pour les premières dates dépendent des niveaux influençants précédant la première date, qui ne sont pas connus. Les niveaux piézométriques des pas de temps de la période de démarrage ne peuvent donc pas être calculés correctement. Ils sont donc ignorés dans la calibration de la diffusivité. Les niveaux piézométriques calculés pendant les pas de temps de cette période de démarrage n'apparaissent pas dans le fichier des résultats.

- **Type de données de nappe (0=Niveaux ; 1=Profondeurs) :**

- Par défaut, si on laisse la valeur 0, les niveaux piézométriques sont donnés en « niveaux », c'est-à-dire positifs vers le haut.
- Si on donne la valeur = 1 : ce sont des profondeurs (positives vers le bas).
  À noter que les niveaux influençants, niveau de la mer ou de la rivière, sont toujours des « niveaux », c'est-à-dire positifs vers le haut.
  Ce paramètre n'a pas d'utilité si les séries sont des séries de température.

- **Visualisation graphique des données et des résultats.**

Si on donne la réponse 1 :

- Visualisation graphique de la série d'entrée (série influençante) et de la série influencée.
- Visualisation de la série influencée observée et calculée par CATHERINE.
- Visualisation de l'écart de simulation (série influencée observée - série calculée).

- **Distance en mètres : Rivière – Piézomètre :**

- C'est la distance en mètres entre la limite influencée et le point de la nappe où on calcule (et observe) le niveau piézométrique. S'il s'agit de transferts thermiques, c'est également la distance en mètres entre la limite et le point de calcul.
- Si les niveaux n'étaient pas exprimés en mètres, mais dans une autre unité, en centimètres par exemple, cette distance devrait être exprimée dans cette même unité.

- **Diffusivité Minimale [pour calibration automatique] :**

- C'est la borne inférieure de la diffusivité pour la calibration automatique.
- La calibration automatique est bien entendu possible uniquement si on dispose d'une série influencée.
- Si on n'a pas de série influencée (premier paramètre à 0), c'est cette valeur minimale de diffusivité qui est utilisée pour le calcul de simulation.

- **Diffusivité Maximale [0 => simulation sans calage] :**

- C'est la borne supérieure de la diffusivité pour la calibration automatique.
- Si la borne supérieure est égale à 0, (ou égale à la borne inférieure) : il n'y a pas de calibration automatique. La simulation est effectuée avec la valeur de diffusivité de l'autre borne.

- **Niveau constant (niveau de référence) [non utilisé en calibration] :**

- Ce paramètre n'est pas utilisé lors d'une calibration automatique de la diffusivité.
- À l'issue de la calibration, la valeur optimale de ce niveau est calculée.
- Ce paramètre, utilisé en simulation, est le « niveau de référence » du piézomètre.
- C'est la valeur de niveau piézométrique qui résulterait d'une série influençante constante dont toutes les valeurs seraient égales à la « valeur antérieure de la série influençante » (voir plus bas). En cas de transfert d'énergie, c'est la température de référence.

- **Unité de Temps des Séries : 0=Heures 1=Jours 2=Mois 3=Ans 4=Minutes :**

- Cinq unités de temps sont possibles : heures (c'est l'unité courante pour un niveau piézométrique influencé par la marée), jour, mois, année, minute.

- **Durée du pas de temps des séries (en unité de temps) :**

- C'est la durée du pas de temps (par défaut 1) dans l'unité de temps choisie.

- **Valeur antérieure de la série influençante (0 -> moyenne des observations) :**

- C'est la valeur de la série influençante avant la première valeur de la série.
- Par défaut, si on laisse la valeur = 0, le calcul prend la moyenne des valeurs de la série influençante.
- Cette valeur est utilisée pour l'initialisation des calculs et permet d'éviter d'avoir une « période de démarrage » trop longue.

- **Série Influençante (par ex Mer ou Rivière) :**

- C'est le nom du fichier contenant la série influençante : niveau de la mer, niveau de la rivière (ou température à la limite pour les transferts d'énergie).

- C’est le nom du fichier commun contenant la série influençante et la série influencée si les deux séries sont regroupées dans un même fichier (conseillé).

    - **2ème série (par ex. niveau piézométrique) si nécessaire :**

- Si la série influencée est dans un fichier séparé : c’est le nom du fichier contenant la série influencée, c’est-à-dire la série des niveaux piézométriques (ou des températures influencées).
- Si les deux séries sont regroupées dans un même fichier : ce paramètre n’est pas pris en compte.

6. Premier exemple d'application : crue ou lâchure dans une rivière

6.1. DESCRIPTION DE L'EXEMPLE

On dispose d'une période d'observation de 77 heures pendant laquelle passe une crue dans une rivière qui borde une nappe. Pendant cette période, il n'y a pas de précipitations significatives sur la nappe.

On a les données, au pas de temps horaire, des hauteurs d'eau dans la rivière et des niveaux piézométriques en un point de la nappe situé à 75 mètre de la rivière.

Le suivi du niveau piézométrique, pendant cette période sans précipitations, montre une nette influence de la crue de la rivière (Figure 7).

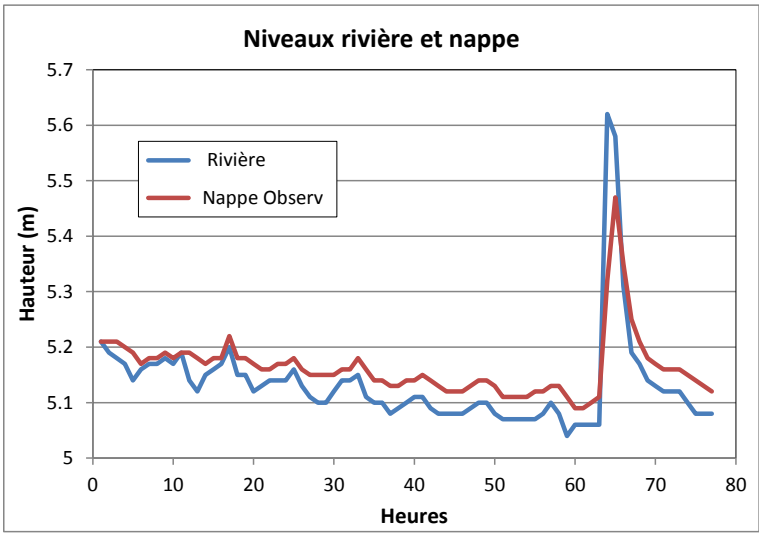


Figure 7 : Évolution des niveaux dans la rivière et dans la nappe au pas de temps horaire.

On cherche à déterminer la diffusivité de la nappe en faisant l'hypothèse que les berges ne sont pas significativement colmatées.

On a constitué un fichier de nom « Riviere_et_NivNap_Crue_Num.prn », composé d'une ligne de texte descriptif suivie de 77 lignes, une ligne par date horaire. Le début de ce fichier est reproduit dans le tableau 1.

Heures	H_Rivière (m)	Niv_Nappe (m)
1	5,21	5,21
2	5,19	5,21
3	5,18	5,21
4	5,17	5,20
5	5,14	5,19

Tableau 1 : Début du fichier des données (Riviere_et_NivNap_Crue_Num.prn).

Les paramètres de calcul ont été définis dans la boite de dialogue du code CATHERINE. Ils sont sauvegardés dans un fichier reproduit ci-dessous.

Exemple : code de calcul Catherine : Influence d'une crue dans la rivière

```
<< Crue pendant 77 heures                                  >>
<< Piézomètre à 75 mètres                                  >>
<< Diffusivité en m2/s                                >>
<< Fichier unique : Numéro , H_Rivière, Niveau piézo   >>
#<V4.1># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
*** Paramètres du modèle CATHERINE                ***
      1= Existence d'une série influencée [1=Oui 0=Non]
      0= Séries dans des fichiers séparés [0=Même fichier ; 1=Fichiers séparés]
      2= Numéro de la colonne de la série influençante (0 => colonne n°1)
      3= Numéro de la colonne de la série influencée (0 => Standard)
     15= Nombre de pas de temps de la période de démarrage
      0= Type de données nappe (0=Niveaux ; 1=Profondeurs)
      1= Visualisation graphique des données et des résultats
     75= Distance en mètres : Rivière - Piézomètre
   5e-2= Diffusivité Minimale [pour calage automatique]
      3= Diffusivité Maximale [0 => simulation sans calage]
      0= Niveau constant (niveau de référence) [non utilisé en calibration]
      0= Unité de Temps des Séries : 0=Heure  1=Jour  2=Mois  3=Année  4=Minute
      1= Durée du pas de temps des séries (en unité de temps)
      0= Valeur antérieure de la série influençante (0 -> moyenne des observations)
*** Fichiers contenant les séries                 ***
Riviere_et_NivNap_Crue_Num.prn  = Série Influençante (par ex Mer ou Rivière)
                                = 2ème série (par ex niveau piézo) si nécessaire
```

Dans cet exemple :

- Les lignes (commençant ici par « << ») sont des commentaires d'explication qui peuvent être rajoutées par l'utilisateur. Comme indiqué, ces lignes doivent être placées avant le séparateur « #<V4.1># --- Fin du texte libre ».
- On a une période d'observation commune de 77 pas de temps.
- Chaque pas de temps vaut 1 heure (« 0 = Unité de Temps des Séries : 0 = Heure » et « 1 = Durée du pas de temps des séries (en unité de temps »).
- On n'a pas des fichiers séparés (« 0 = même fichier »).
- Dans le fichier : « Numéro de la colonne contenant la série influençante = 2 » (car la 1ère colonne est ici le numéro du pas de temps en heure). La série influençante est la hauteur de l'eau dans la rivière (en mètres).
- Dans le fichier : « Numéro de la colonne contenant la série influencée = 3 ». La série influencée est le niveau piézométrique (en mètres).
- On ne prend pas en compte les 15 premiers pas de temps de niveau piézo, car ils dépendent fortement des niveaux dans la rivière, inconnus avant le début des mesures.
- La distance Rivière-Piézomètre est égale à 75 mètres.
- Le calcul sera fait par optimisation automatique et on se donne les bornes suivantes pour la diffusivité (T/S) à identifier :
  - Valeur minimale = 5 10^{-2} m^2/s,

· Valeur maximale = 3 m^2/s.

La calibration automatique de la diffusivité s'effectue, par une méthode de dichotomie, en moins d'une seconde.

Extrait du fichier listing généré (par défaut de nom « catherin.txt ») :

Premier balayage pour analyse, de la borne mini à la borne maxi autorisée :

Diffusivité m^2/s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
5.000E-02	-0.1945	5.16	5.819E+00
5.288E-02	-0.1762	5.16	6.969E+00
5.865E-02	-0.1264	5.16	1.098E+01
7.019E-02	0.1355	5.16	1.152E+01
9.326E-02	0.3078	5.16	5.471E+00
1.394E-01	0.4944	5.16	3.046E+00
2.317E-01	0.6895	5.16	1.457E+00
4.162E-01	0.8548	5.16	5.283E-01
7.853E-01	0.9543	5.16	1.195E-01
1.524E+00	0.9827	5.16	-1.696E-03
3.000E+00	0.9604	5.16	-1.897E-02

Optimisation par dichotomie :

Diffusivité m^2/s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
5.000E-02	-0.1945	5.16	7.053E+00
3.000E+00	0.9604	5.16	-1.897E-02
1.525E+00	0.9827	5.16	-1.556E-03
7.875E-01	0.9546	5.16	1.189E-01
1.156E+00	0.9786	5.16	2.812E-02
1.341E+00	0.9820	5.16	9.618E-03
1.433E+00	0.9826	5.16	3.354E-03
1.479E+00	0.9827	5.16	7.577E-04
1.502E+00	0.9827	5.16	-4.344E-04
1.490E+00	0.9827	5.16	1.515E-04
1.493E+00	0.9827	5.16	0.000E+00

En fin de calcul :

Diffusivité m^2/s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
1.493E+00	0.9827	5.16	0.000E+00

Le résultat obtenu est donc :

- Diffusivité T / S = 1,493 m^2/s (c'est une valeur élevée, expliquée car la nappe est captive).
- Coefficient de corrélation entre les niveaux piézométriques observés et simulés = 0,983.
- En fait, ce critère, plus sévère qu'un coefficient de corrélation, est la racine carrée du coefficient de Nash (Nash and Sutcliffe, 1970).
- Niveau constant = 5,16 m (c'est le niveau au repos en dehors de l'influence de la crue).

(la 4ème colonne, qui est la dérivée du coefficient de corrélation par rapport à la diffusivité, n'a pas d'utilité particulière ici)

La Figure 8 montre la qualité de l'ajustement obtenu.

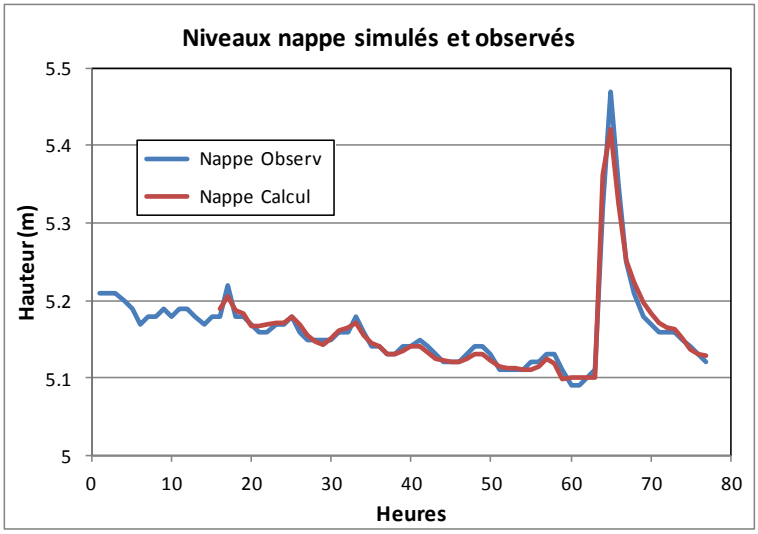


Figure 8 : Comparaison des niveaux piézométriques observés et calculés à partir du niveau dans la rivière.

En fin de simulation on obtient un fichier listage, de nom par défaut « **catherin.txt** », qui récapitule les paramètres et calculs. On obtient également un fichier de résultats, de nom par défaut « **catherin.prn** », qui peut être directement importé sous Excel (ou Open Office) pour visualiser les séries calculées et les comparer aux séries d'entrée.

7. Deuxième exemple : influence de la marée

7.1. DESCRIPTION DE L'EXEMPLE

Il s'agit d'un exemple situé dans l'île de la Martinique (Leclerc, 2009). On dispose d'une période d'observation de 15 jours (360 heures) du niveau de la mer (marégraphe) et du niveau piézométrique en un point situé à 14 m de la mer. Les données sont disponibles au pas de temps horaire. La Figure 9 montre des variations parallèles. On remarque que le piézomètre a un niveau environ 1 m au-dessus du niveau de la mer et présente des fluctuations amorties : environ 0,2 m de fluctuation au piézomètre et 0,4 m au marégraphe.

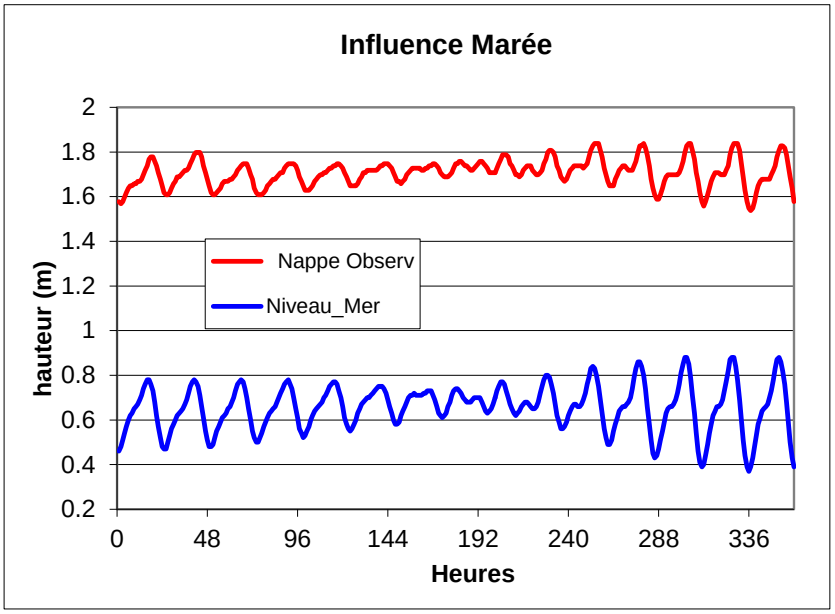


Figure 9 : Niveaux au pas de temps horaire dans la mer et dans la nappe.

On cherche à déterminer la diffusivité de la nappe. Dans ce but on a constitué un fichier de nom « NivNap_et_Mer_Martiniq_Date.prn », composé d'une ligne de texte descriptif suivie de 360 lignes, une ligne par heure. Le début de ce fichier est reproduit dans le Tableau 2.

Date	Piézo St Pierre	Hauteur eau SHOM	Num
01/11/2008 00:00	1,578	0,46	1
01/11/2008 01:00	1,568	0,48	2
01/11/2008 02:00	1,578	0,51	3
01/11/2008 03:00	1,598	0,54	4
01/11/2008 04:00	1,618	0,57	5

Tableau 2 : Début du fichier des données (NivNap_et_Mer_Martiniq_Date.prn).

Les paramètres de calcul, reproduits ci-dessous, ont été définis dans la boite de dialogue du code de calcul CATHERINE :

Paramètres du code de calcul Catherine Martinique
<< Relation Marégraphe – Piézomètre >>

<< Diffusivité en m^2/s >>
<< Fichier unique : Date, Niveau piézo , Mer >>
#<V4.1># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
*** Paramètres du modèle CATHERINE ***
1= Existence d'une série influencée [1=Oui 0=Non]
0= Séries dans des fichiers séparés [0=Même fichier ; 1=Fichiers séparés]
4= Numéro de la colonne de la série influençante (0 => colonne n°1)
3= Numéro de la colonne de la série influencée (0 => Standard)
12= Nombre de pas de temps de la période de démarrage
0= Type de données nappe (0=Niveaux ; 1=Profondeurs)
1= Visualisation graphique des données et des résultats
14= Distance en mètres : Rivière - Piézomètre
2e-3= Diffusivité Minimale [pour calage automatique]
3= Diffusivité Maximale [0 => simulation sans calage]
0= Niveau constant (niveau de référence) [non utilisé en calibration]
0= Unité de Temps des Séries : 0=Heure 1=Jour 2=Mois 3=Année 4=Minute
1= Durée du pas de temps des séries (en unité de temps)
0= Valeur antérieure de la série influençante (0 -> moyenne des observations)
*** Fichiers contenant les séries ***
NivNap_et_Mer_Martiniq_Date.prn = Série Influençante (par ex. Mer ou Rivière)
= 2ème série (par ex. niveau piézo) si nécessaire

Dans cet exemple :

- On a une période d'observation commune de 360 pas de temps.
- Chaque pas de temps vaut 1 heure (« 0= Unité de Temps des Séries : 0=Heure » et « 1= Durée du pas de temps des séries (en unité de temps »).
- On n'a pas des fichiers séparés (« 0 = même fichier »).
- Dans le fichier : « Numéro de la colonne contenant la série influençante = 4 » (car la $1^{ère}$ colonne est ici la date « jj/mm/aaaa », la $2^{ème}$ est l'heure « hh :mm » (parce qu'elle est séparée par un espace), la $3^{ème}$ colonne est le niveau piézométrique. La $4^{ème}$ colonne est la série influençante, qui est le niveau de la mer au marégraphe.
- Dans le fichier : « Numéro de la colonne contenant la série influencée = 3 ». La série influencée est le niveau piézométrique (en mètres).
- On ne prend pas en compte les 12 premiers pas de temps de niveau piézométrique, car ils dépendent fortement des niveaux dans la mer, inconnus avant le début des mesures.
- La distance Mer-Piézomètre est égale à 14 mètres.
- Le calcul sera fait par optimisation automatique et on se donne les bornes suivantes pour la diffusivité (T/S) à identifier :
  - Valeur minimale = $2\ 10^{-3}\ m^2/s$,
  - Valeur maximale = $3\ m^2/s$.

La calibration automatique de la diffusivité s'effectue en moins d'une seconde.

Diffusivité m^2/s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
2.000E-03	0.3463	1.71	2.730E+02
4.931E-03	0.7389	1.71	6.446E+01
1.079E-02	0.9123	1.71	1.139E+01
2.251E-02	0.9469	1.71	-1.016E+00
4.596E-02	0.8959	1.71	-2.435E+00
9.285E-02	0.7994	1.71	-1.678E+00
1.866E-01	0.6833	1.71	-9.230E-01
3.742E-01	0.5613	1.71	-4.693E-01
7.493E-01	0.4386	1.71	-2.355E-01
1.500E+00	0.3130	1.71	-1.249E-01
3.000E+00	0.1655	1.71	-8.766E-02

Diffusivité m^2/s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
2.000E-03	0.3463	1.71	8.636E+01
3.000E+00	0.1655	1.71	-8.760E-02
1.501E+00	0.3128	1.71	-1.250E-01
7.515E-01	0.4380	1.71	-2.351E-01
3.767E-01	0.5601	1.71	-4.647E-01
1.894E-01	0.6807	1.71	-9.015E-01
9.569E-02	0.7947	1.71	-1.609E+00
4.884E-02	0.8889	1.71	-2.358E+00
2.542E-02	0.9430	1.71	-1.988E+00
1.371E-02	0.9357	1.71	2.112E+00
1.957E-02	0.9483	1.71	-9.250E-01
1.705E-02	0.9464	1.71	-6.541E-03

Après optimisation :

Diffusivité m^2/s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
1.705E-02	0.9464	1.71	-6.541E-03

Le résultat obtenu est :

- dffusivité T / S = 1,05 10^{-2} m^2/s ;
- cefficient de corrélation entre les niveaux piézométriques observés et simulés = 0.946 (en fait, ce critère, plus sévère qu'un coefficient de corrélation, est la racine carrée du coefficient de Nash) ;
- nveau constant = 1,1 m.

La Figure 10 montre que l'ajustement est très bon.

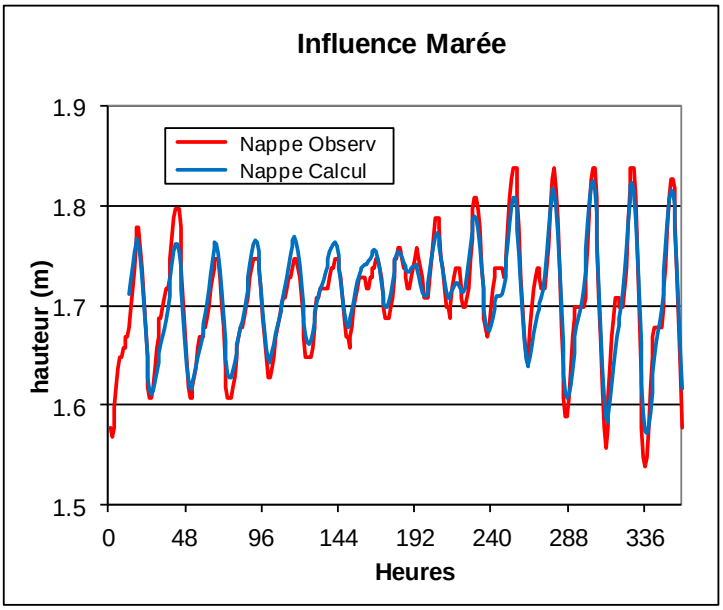


Figure 10 : Comparaison des niveaux piézométriques observés et calculés à partir du niveau dans la mer.

8. Troisième exemple : rivière colmatée

8.1. DESCRIPTION DE L'EXEMPLE

Il s'agit d'un exemple (théorique) où les berges de la rivière sont fortement colmatées et pour lequel on dispose de plusieurs piézomètres.

On utilise une méthode un peu différente permettant de déterminer le colmatage sous forme d'une distance additionnelle équivalente au colmatage. Quand un piézomètre est situé à la distance **x** d'une rivière colmatée, il réagit approximativement comme s'il était situé à la distance **x + xc**, xc étant la distance additionnelle inconnue (Thiéry et Trémembert, 1979).

Pour identifier la diffusivité vraie de la nappe $\mathbf{D_V}$ et la distance $\mathbf{x_c}$ on procède de la manière suivante : on utilise le code de calcul CATHERINE, mais pour chaque piézomètre on utilise une distance fictive égale à 1 mètre. On obtient ainsi une diffusivité fictive **D_1m**, correspondant à une distance de 1 mètre. En considérant le nombre adimensionnel $D \cdot t / x^2$, on peut montrer qu'on a la relation approchée :

$$\frac{1}{\sqrt{D\_1m}} = (x + xc)\frac{1}{\sqrt{D_V}}$$

soit :

$$\frac{1}{\sqrt{D\_1m}} = x \cdot \frac{1}{\sqrt{D_V}} + \frac{xc}{\sqrt{D_V}}$$

Si on reporte les valeurs de $\frac{1}{\sqrt{D\_1m}}$ obtenues pour chaque piézomètre en fonction de x, on obtient une relation linéaire $\frac{1}{\sqrt{D\_1m}} = a \cdot x + b$.

soit par identification : $D_V = 1 / a^2$ et $xc = b \cdot \sqrt{D_V} = b/a$

Pour cet exemple théorique on dispose de quatre piézomètres pour lesquels les valeurs obtenues sont rassemblées dans le Tableau 3.

Distance (m)	D_1m (m^2/s)
30	$3.698\ 10^{-6}$
45	$1.929\ 10^{-6}$
70	$1.208\ 10^{-6}$
80	$8.573\ 10^{-7}$

Tableau 3 : Données des quatre piézomètres à proximité d'une rivière colmatée

En reportant $\frac{1}{\sqrt{D\_1m}}$ en fonction de x (Figure 11), on obtient une relation linéaire avec a = 10.46 et b = 219. (« Courbe de tendance » de Excel), qui s'écrit aussi : $\frac{1}{\sqrt{D\_1m}}$ = 10.46 . (x + 20.94).

On en déduit alors la valeur de la diffusivité moyenne de la nappe et la valeur de la distance équivalente correspondant au colmatage :

- $D_V = 1 / a^2$ = **$9.14\ 10^{-3}$ m^2/s ;**
- $xc = b/a$ = **20.94 m.**

Le colmatage correspond donc approximativement à une distance additionnelle de 21 m.

Si on n'avait pas pris en compte le colmatage on aurait obtenu les valeurs du Tableau 4. On voit que les valeurs obtenues auraient été nettement différentes. Elles auraient été variables d'un piézomètre à l'autre, et surtout de 2 à 3 fois plus faibles que la vraie valeur.

Distance (m)	D_apparent (m^2/s)
30	$3.17\ 10^{-3}$
45	$4.26\ 10^{-3}$
70	$5.41\ 10^{-3}$
80	$5.74\ 10^{-3}$

Tableau 4 : Données de diffusivité apparente sans prise en compte du colmatage.

En fait, cette méthode est approchée et on aurait pu tout aussi bien utiliser une autre méthode consistant à appliquer successivement le code de calcul CATHERINE aux couples de piézomètres situés à 30 m et 45 m, à 45 m et 70 m, etc. On obtient alors des valeurs de l'ordre de $8\ 10^{-3}$ à $11\ 10^{-3}$ m^2/s, donc proches de la valeur moyenne obtenue précédemment. Pour appliquer la méthode à un couple de piézomètres situés respectivement à 30 m et 45 m, on procède de la manière suivante : on considère que celui des piézomètres qui est le plus proche, celui situé à 30 m, joue le rôle de la « rivière » ou « série influençante », et que le deuxième piézomètre joue le rôle de la « série influencée » et est situé à 45 m – 30 m = 15 m de la « série influençante ».

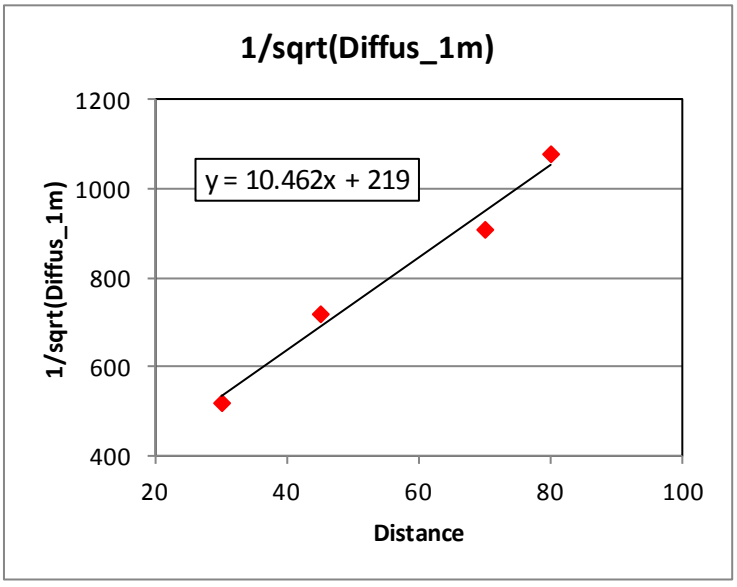


Figure 11 : Quatre piézomètres : ajustement de 1/sqrt(D_1m) en fonction de la distance.

9. Quatrième exemple : transferts thermiques

9.1. DESCRIPTION DE L'EXEMPLE

Cet exemple est relatif aux transferts de chaleur suivis pendant 5 ans sur 6,5 m de profondeur dans un sol crayeux.

Comme expliqué plus haut, on note **ρC** la chaleur spécifique du milieu (en J/m^3/K) et **λ** sa conductivité thermique (en W/m/K). La diffusivité thermique $\mathbf{D_{TH}}$ est le rapport **λ** / **ρC**, qui est donc exprimé en m^2/s, comme la diffusivité hydraulique.

L'équation de la conduction de la chaleur et l'équation des transferts hydrauliques étant identiques (« équation de la chaleur »), on peut utiliser le code de calcul CATHERINE exactement comme dans les exemples précédents, en remplaçant :

- la diffusivité hydraulique par la diffusivité thermique ;
- les niveaux par les températures.

Dans cet exemple, on dispose de l'évolution de la température à 20 cm, 200 cm, 400 cm et 650 cm de profondeur, de 2006 à 2010 (Figure 12). La fluctuation de température à 20 cm de profondeur, de périodicité égale à 1 an, est bien évidemment due à l'influence de la température de l'air qui résulte de l'alternance des saisons. On veut identifier la diffusivité thermique entre ces profondeurs, c'est-à-dire dans les horizons 20-200 cm, 200-400 cm, 400-650 cm.

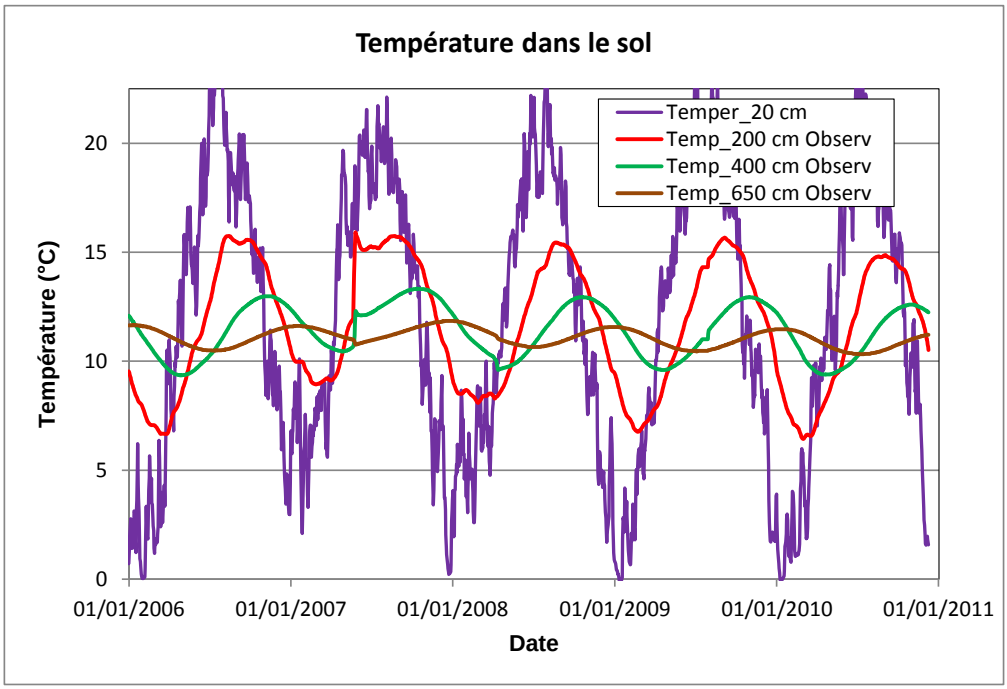


Figure 12 : Évolution de la température à 20, 200, 400 et 650 cm de profondeur, de 2006 à 2010.

On a donc simulé successivement la température à 200 cm à partir de celle à 20 cm, la température à 400 cm à partir de celle à 200 cm, et la température à 650 cm à partir de celle à 400 cm.

On présente ci-dessous les paramètres de la première tranche de profondeur :

```
Code Catherine : Température 20 cm => 200 cm : 01/01/2006-09/12/2010
 << 1805 jours >>
 #<V4.1># --- Fin du texte libre --- ; Ne pas modifier/retirer cette ligne
 *** Paramètres du modèle CATHERINE              ***
       1= Existence d'une série influencée [1=Oui 0=Non]
       0= Séries dans des fichiers séparés [0=Même fichier ; 1=Fichiers séparés]
       1= Numéro de la colonne de la série influençante (0 => colonne n°1)
       4= Numéro de la colonne de la série influencée (0 => Standard)
     150= Nombre de pas de temps de la période de démarrage
       0= Type de données nappe (0=Niveaux ; 1=Profondeurs)
       1= Visualisation graphique des données et des résultats
     1.8= Distance en mètres : Rivière - Piézomètre
    2e-7= Diffusivité Minimale [pour calage automatique]
    2e-6= Diffusivité Maximale [0 => simulation sans calage]
       0= Niveau constant (niveau de référence) [non utilisé en calibration]
       1= Unité de Temps des Séries : 0=Heures  1=Jour  2=Mois  3=Année  4=Minute
       1= Durée du pas de temps des séries (en unité de temps)
       0= Valeur antérieure de la série influençante (0 -> moyenne observations)
 *** Fichiers contenant les séries              ***
Temperat_20_a_650_cm_2006_2010.prn = Série Influençante (par ex. Mer ou Rivière)
                                   = 2ème série (par ex. niveau piézo) si nécessaire
```

Dans cet exemple :

- On a une période d'observation commune de 1 805 pas de temps de 1 jour (soit environ 5 ans).
- Chaque pas de temps vaut 1 jour (« 1 = Unité de Temps des Séries : 1 = Jour » et « 1 = Durée du pas de temps »).
- On n'a pas des fichiers séparés (« 0 = même fichier »).
- On ne prend pas en compte les 150 premiers pas de temps d'observation de température à 200 cm de profondeur, car ils dépendent fortement des températures à 20 cm, qui sont inconnues avant le début des mesures.
- La distance « Température influençante - Température influencée » est égale à 200 cm – 20 cm = 1,8 mètres.
- Le calcul sera fait par optimisation automatique et on se donne les bornes suivantes pour la diffusivité thermique à identifier :
  - valeur minimale = $2\ 10^{-7}$ m^2/s,
  - valeur maximale = $2\ 10^{-6}$ m^2/s.

Le calcul s'effectue en 1 seconde et donne un très bon ajustement. On effectue le même calcul avec les couples de températures (200 cm - 400 cm) et (400 cm – 650 cm).

Les résultats obtenus pour les 1 805 pas de temps sont rassemblés dans le Tableau 5.

Tranche cm	Diffusivité m²/s	Constante (°C)	Corrélation
20 - 200	$5.47\ 10^{-7}$	11.6	0.991
200 - 400	$4.87\ 10^{-7}$	11.41	0.992
400 - 650	$4.98\ 10^{-7}$	11.04	0.985

Tableau 5 : Calcul de la diffusivité thermique en 3 tranches de profondeur du sol.

On voit que les ajustements sont très bons (coefficients de corrélation de l'ordre de 0.99). Les diffusivités thermiques obtenues sont proches, entre 4.9 et 5.5 10^{-7} m^2/s. La température de référence est de l'ordre de 11,5 °C.

Les Figure 13 à Figure 15 montrent les températures observées et calculées pour chacune des trois tranches de température, et la Figure 16 rassemble les simulations des trois tranches.

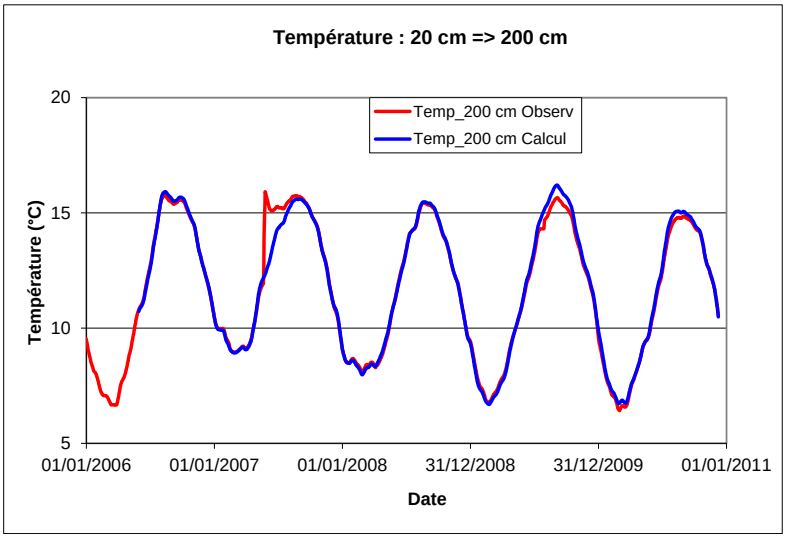


Figure 13 : Températures observée et simulée à 200 cm à partir de la température à 20 cm.

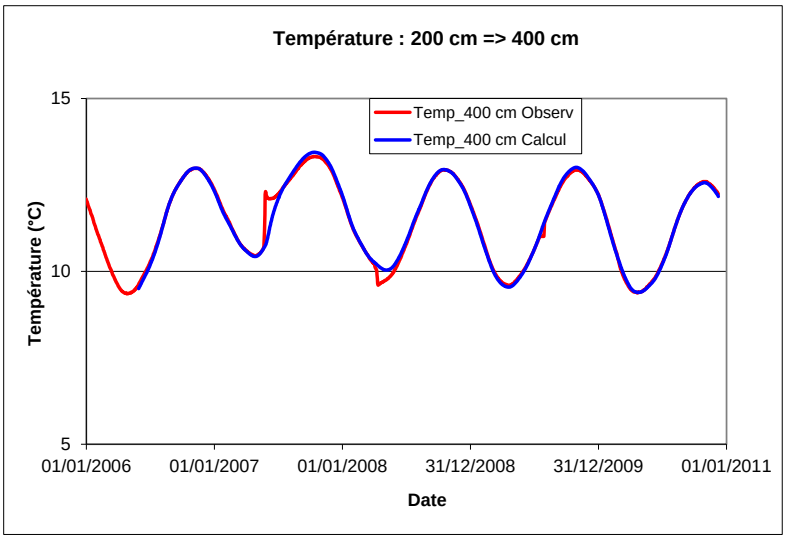


Figure 14 : Températures observée et simulée à 400 cm à partir de la température à 200 cm.

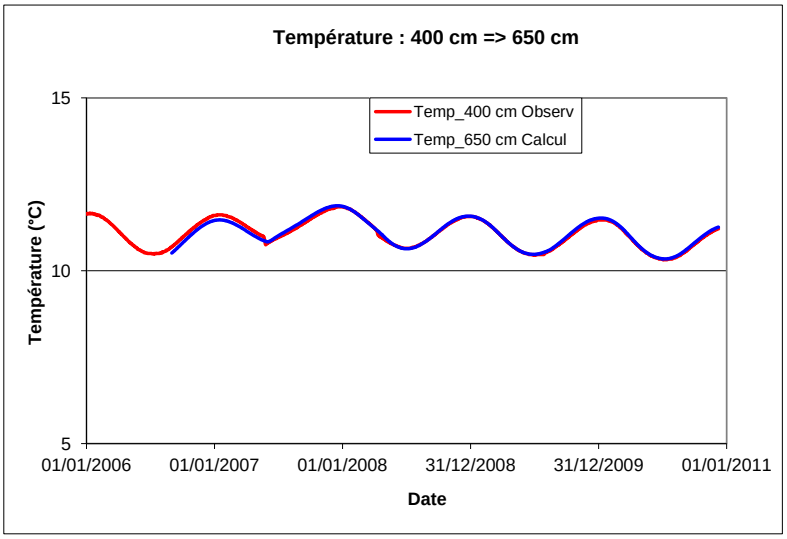


Figure 15 : Températures observée et simulée à 650 cm à partir de la température à 400 cm.

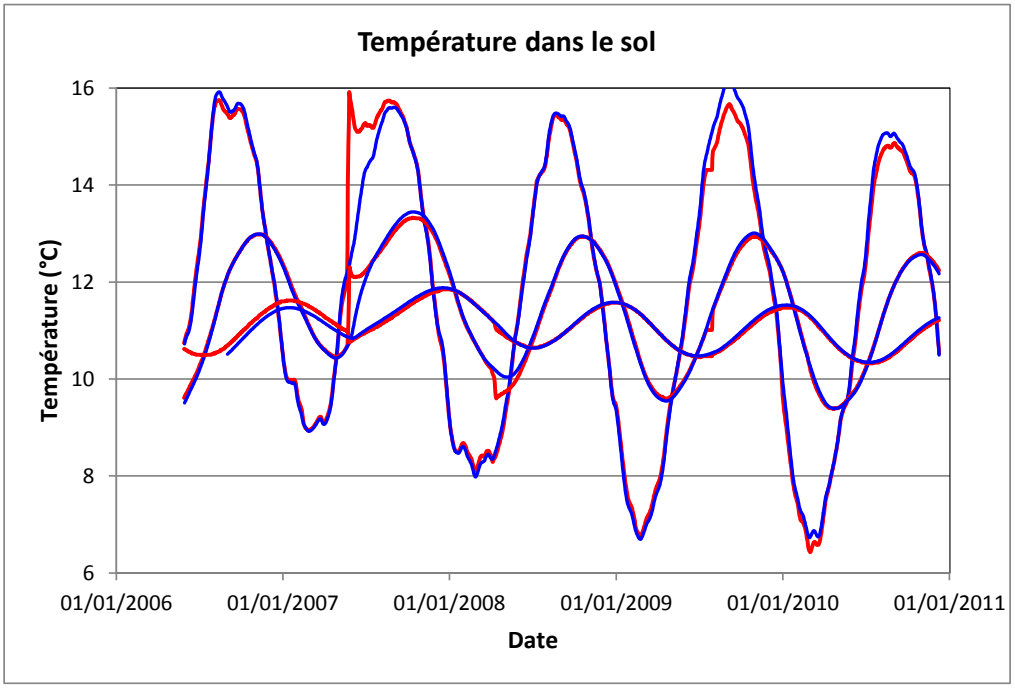


Figure 16 : Températures observée et simulée à 200 cm, 400 cm et 650 cm.

10. Conclusion

Le code de calcul CATHERINE v4.1, très simple de mise en œuvre, permet de réaliser les opérations suivantes.

- **Pour un aquifère bordé par une limite rectiligne (rivière, lac, mer) dont le niveau varie au cours du temps :**

- Calcul de la diffusivité hydraulique d'un aquifère à partir d'un suivi des variations temporelles simultanées du niveau piézométrique en un point d'une nappe souterraine et du niveau d'eau dans une rivière, dans un plan d'eau ou dans la mer.
  Si on connaît le coefficient d'emmagasinement, on peut en déduire la transmissivité (et la perméabilité).
  Réciproquement, si on connaît la transmissivité, on peut en déduire le coefficient d'emmagasinement.
- Calcul de la diffusivité d'un aquifère à partir d'un suivi simultané des variations temporelles du niveau piézométrique en deux piézomètres.
- Calcul des variations de niveau piézométrique en un point d'une nappe dont on connaît la diffusivité et qui est bordée par une limite (rivière, lac, mer) dont on connaît les variations de hauteur.
- Correction d'un niveau piézométrique des variations de niveau induites par la marée, ou le passage d'une crue ou d'une lâchure. Il est alors possible d'utiliser le niveau piézométrique corrigé pour interpréter un pompage d'essai ou pour modéliser la relation pluie-niveau.

En calcul de transfert d'énergie, il est possible de réaliser les opérations suivantes :

- **Pour un aquifère ou un sol bordé par une limite rectiligne dont la température varie au cours du temps :**

- Calcul de la diffusivité thermique d'un aquifère à partir d'un suivi des variations temporelles simultanées de la température en un point d'un milieu conducteur de la chaleur (sol ou nappe immobile par exemple) et de la température en une limite.
  Si on connaît la conductivité thermique, on peut ainsi en déduire la capacité calorifique.
  Réciproquement, si on connait la capacité calorifique, on peut en déduire la conductivité thermique.
- Calcul de la diffusivité thermique d'un aquifère à partir d'un suivi des variations temporelles simultanées de la température en deux points.
- Calcul des variations de température en un point d'un milieu dont on connaît la diffusivité thermique et qui est bordé par une limite dont on connaît les variations de température.
  Il est ainsi possible de connaître les variations thermiques dans un sol, connaissant l'évolution de la température en surface (ou dans l'air).
- Correction des variations de température induites par les variations de température à la surface d'un sol. Il est alors possible d'utiliser les températures corrigées pour analyser l'efficacité d'un stockage de chaleur.

11. Références

Leclerc B. (2009) - Réseau piézométrique de Martinique – Année 2008. Rapport BRGM/RP-57178-FR.

Nash J.E. and Sutcliffe J.V. (1970) - River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology,* 10 (3), p. 282–290.

Peaudecerf P. (1970) - Calcul automatique de la diffusivité des nappes en relation avec un plan d'eau libre. Rapport BRGM 70 SGN 083 HYD.

Thiéry D. (1984) - Programme Catherine : Calcul théorique de l'effet d'une rivière sur une nappe. Note Technique interne BRGM NT 84/06.

Thiéry D. (1991) - Identification automatique de la diffusivité d'un aquifère limité par un plan d'eau aux berges colmatées. Note Technique interne BRGM Note/91-4S-EAU-023.

Thiéry D. et Trémembert J. (1979) - Étude hydrogéologique en vue de la détermination de l'aire d'influence des forages de Martin-Église (ville de Dieppe). Rapport BRGM 79-SGN-686-HNO. 55 p.

Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Écotechnologies
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr